

Artículo científico

Evaluación de la marea de tormenta en sitios con escasez de datos: río Pánuco, México



R. Meza-Padilla^a, C.M. Appendini^{a,*}, A. Pedrozo-Acuña^b y F. González-Villarreal^b

^a Laboratorio de Ingeniería y Procesos Costeros, Instituto de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México, Sisal, México

^b Instituto de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad Universitaria, México D.F., México

INFORMACIÓN DEL ARTÍCULO

Historia del artículo:

Recibido el 30 de enero de 2015

Aceptado el 17 de septiembre de 2015

On-line el 30 de noviembre de 2015

Palabras clave:

Marea de tormenta

Ciclones tropicales

Análisis extremal

Río Pánuco

México

R E S U M E N

En las regiones tropicales, los daños generados por inundaciones costeras se deben principalmente a la marea de tormenta generada por ciclones tropicales. Sin embargo, la estimación de la marea de tormenta está limitada por la escasez de mediciones y de información histórica de estos eventos. En México esto es particularmente relevante puesto que la información es muy escasa. De esta manera, este trabajo de investigación presenta un método alternativo para estimar periodos de retorno de marea de tormenta generada por ciclones tropicales, en sitios con insuficiente información histórica. El marco de trabajo seleccionado consiste en la implementación de modelos hidrodinámicos a fin de reproducir la sobre-elevación del nivel medio del mar inducida por la presencia de ciclones tropicales en la costa. Para ello, se utilizan de manera conjunta eventos históricos (25) entre 1951 y 2012, y eventos sintéticos (120) generados en el Océano Atlántico durante el periodo de tiempo definido entre los años 1980 y 2010, ambos conjuntos de eventos limitados en una región circular de 100 km alrededor de la desembocadura del río Pánuco en México (22,26°N; 97,78°W). Los campos de viento de estos eventos se utilizan como forzamiento de un modelo hidrodinámico, a fin de definir el nivel máximo de marea de tormenta en el punto de interés. La información así obtenida permite la realización de un análisis de valores extremos más confiable, que determina la marea de tormenta para distintos periodos de retorno. Los resultados demuestran la bondad de esta metodología para utilizar eventos sintéticos en combinación con información histórica, a fin de incrementar la confiabilidad de los valores de diseño en zonas con escasez de datos.

© 2015 IAHR y WCCE. Publicado por Elsevier España, S.L.U. Este es un artículo Open Access bajo la licencia CC BY-NC-ND (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

Evaluation of the storm surge in data sparse sites: Panuco River, Mexico

A B S T R A C T

Storm surge from tropical cyclones is the main cause of flood induced damage in tropical regions. Nevertheless, storm surge estimations are limited by the scarcity of measurements and historical information of tropical cyclones. This is particularly true in Mexico because data is very scarce. Thus, this research presents an alternative method for estimating storm surge values from tropical cyclones for different return periods, in areas with insufficient historical information. The selected framework consists on the implementation of hydrodynamic models to reproduce the mean sea level elevation induced by the presence of tropical cyclones on the coast. For this, we used synthetic events (120 events) generated in the Atlantic Ocean during the defined time period between 1980–2010 and limited to a 100 km circular region around the mouth of the Panuco River in Mexico (22.26°N, 97.78°W), together with historical events (25) occurring between 1951 and 2012. The wind fields of these events are used as forcing for a hydrodynamic model in order to define the maximum storm surge at the point of interest. The

Keywords:

Storm surge

Tropical cyclones

Extreme value analysis

Panuco river

México

* Autor para correspondencia.

Correo electrónico: appendini@iingen.unam.mx (C.M. Appendini).

obtained information allows for a more reliable extreme value analysis to determine storm surge levels for different return periods. The results demonstrate the usefulness of this methodology for using synthetic events in combination with historical information, in order to increase the reliability of the design values in areas with limited data.

© 2015 IAHR y WCCE. Published by Elsevier España, S.L.U. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

1. Introducción

A nivel mundial, las inundaciones son los desastres naturales que más pérdidas materiales y humanas producen [1]. En consecuencia, no es gratuito que diversos países hayan abocado sus esfuerzos a la reducción de los impactos asociados a estos eventos [2,3]. Dentro de la clasificación de las inundaciones, aquellas que se generan en zonas costeras han recibido gran atención por parte de los investigadores de diversos campos del conocimiento [4]. Esto se debe a la gran cantidad de población y ciudades localizadas en estas regiones. En regiones tropicales, las inundaciones costeras se deben principalmente a la presencia cercana de ciclones tropicales cuyos fuertes vientos, combinados con un oleaje intenso y el gradiente de presión en la superficie del mar, generan una perturbación (p. ej., sobreelevación) temporal del nivel medio del mar, conocido como marea de tormenta. La magnitud de esta sobreelevación es resultado de una compleja interacción entre la intensidad de la tormenta y la configuración topobatiométrica de la costa, por lo que no responde a una asociación lineal [5–7].

Este fenómeno es responsable de muchos de los daños y pérdidas de vidas asociados a los huracanes [8]. Lo anterior quedó de manifiesto después de la incidencia de huracanes como Ike en 2008, el cual generó una marea de tormenta cuantificada en cerca de 5,4 m sobre el nivel medio del mar en el Condado de Chambers, en Texas [6] y la supertormenta Sandy (clasificada con un periodo de retorno de 500 años), que en 2011 produjo una marea de tormenta de hasta 2,75 m sobre el nivel de pleamar máxima media en Battery, Nueva York [9]. Estos y otros eventos han resaltado la necesidad de generar una mejor comprensión de estos fenómenos y sus consecuencias.

Estudios recientes han señalado que en aquellas regiones donde la plataforma continental tiene una pendiente suave, el tamaño de la tormenta es un factor determinante para la generación de esta perturbación [10,11]. A pesar de estos avances, todavía no existe una comprensión adecuada del fenómeno, por lo que su predicción se realiza a través de la aplicación de modelos paramétricos que están en función de variables como la velocidad del viento, el radio máximo del vórtice y la presión mínima [12–16]. Una estrategia de predicción alternativa consiste en el uso de modelos hidrodinámicos forzados a partir de los campos de viento generados por el huracán, los cuales permiten estimar la marea de tormenta asociada a estos eventos tal y como se hace con los modelos Sea Lake and Overland Surges (SLOSH) [17] y Advanced Circulation Model (ADCIRC) [18,19]. En ambos casos, existen desventajas inherentes al proceso de predicción, pues se requiere de información sobre las variables climáticas que definen al huracán y que pocas veces está disponible para todos los eventos históricos. Más aun, la poca frecuencia con la que ocurren los fenómenos limita la confiabilidad de los resultados que se obtienen a partir de mediciones incompletas de pocos eventos.

En este sentido, existe un método alternativo para superar el problema de escasez de datos, que consiste en el uso de ciclones tropicales sintéticos [20]. Estos eventos se generan por medio de un modelo que utiliza semillas aleatorias de vórtices que se desarrollan o disipan según las condiciones oceánicas y atmosféricas obtenidas a partir de los datos del reanálisis del Centro Nacional de Predicción para el Medio Ambiente del Centro Nacional

de Investigación Atmosférica de Estados Unidos (NCEP/NCAR, por sus siglas en inglés). Los eventos sintéticos contienen una serie de trayectorias con la intensidad correspondiente a lo largo de la vida del ciclón tropical y cubren el periodo de tiempo definido entre los años 1980 y 2010. Su generación se explica detalladamente en Emanuel [21] y Emanuel et al. [22,23]. Con esta metodología se incrementa el número de eventos que se utilizan para la determinación de valores extremos de sobreelevación por marea de tormenta.

Por su ubicación y naturaleza geográfica, México favorece la presencia de ciclones tropicales que afectan las zonas costeras en ambos litorales (con un promedio de 25 eventos anuales que se generan en el Atlántico Norte y el Pacífico Nororiental). Sin embargo, como resultado de la escasez de mediciones de variables climáticas durante la incidencia de ciclones tropicales, no existen hasta el momento estimaciones confiables ni de marea de tormenta que estos producen, ni de su probabilidad de incidencia (p. ej., periodo de retorno). En este sentido, el presente trabajo de investigación utiliza los ciclones tropicales generados de manera sintética por Emanuel et al. [22,23] para determinar el nivel de inundación por marea de tormenta en la zona de la desembocadura del río Pánuco en el Golfo de México. En este lugar, además de las implicaciones que tiene la inundación por marea de tormenta, existe la posibilidad de inundaciones fluviales en la planicie del río como resultado del drenaje de grandes avenidas ($Q \sim 10.000 \text{ m}^3/\text{s}$). Este condicionamiento natural implica que en la zona de la desembocadura de un río de grandes dimensiones como es el Pánuco existe la posibilidad de una incidencia simultánea de avenidas extraordinarias con el río y una sobreelevación de marea de tormenta en su desembocadura, lo cual disminuiría su capacidad hidráulica para el drenaje del agua en exceso, incrementando considerablemente el riesgo por inundación en la zona, tal y como se ha evidenciado en otros casos [24]. Sin embargo, estudios recientes indican que es posible que, en algunos casos, la acción combinada de marea de tormenta y avenidas en un río no sea simultánea, dado que existe un retraso en los forzamientos incidentes sobre el sistema (lluvia en la parte alta y vientos intensos) respecto a la respuesta que se registra en la desembocadura [25] (gasto en el río y nivel del mar). De esta manera, el trabajo que se presenta en esta investigación establece, exclusivamente, los valores extremos debidos a sobreelevación del nivel del mar por marea de tormenta en la desembocadura del río Pánuco.

Para obtener los valores de marea de tormenta, se reproducen numéricamente los eventos históricos y los eventos sintéticos a través de la aplicación de un modelo hidrodinámico en 2 dimensiones e integrado en la vertical [26]. Por último, se realiza un análisis de valores extremos a los resultados obtenidos, para así definir los periodos de retorno a los niveles de marea de tormenta determinados en ese punto. Este esfuerzo se construye sobre experiencias anteriores en la misma región [27].

La organización de este trabajo es la siguiente: en la sección 2 se presenta el área de estudio; en la sección 3 la implementación de la metodología numérica utilizada; la sección 4 presenta la validación del uso de eventos sintéticos; la sección 5 expone los resultados de la modelación numérica; la sección 6 presenta el análisis de valores extremos y en la sección 7 se lleva a cabo un breve resumen con las conclusiones más importantes que se desprenden de esta investigación.

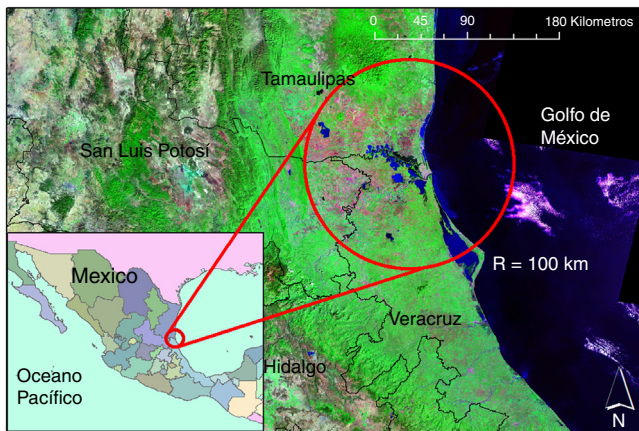


Figura 1. Área de estudio centrada en la desembocadura del río Pánuco en Tampico, Tamaulipas; la región de interés es definida por un círculo rojo con radio $R = 100$ km.

2. Área de estudio

En México existe una mayor incidencia de ciclones tropicales sobre la costa ubicada en la vertiente del Golfo de México. En esta zona se encuentran las regiones que con mayor frecuencia se ven afectadas por eventos hidrometeorológicos extremos [24,28]. Dentro del litoral atlántico de México, se encuentra el caso específico de la cuenca del río Pánuco que desemboca al Golfo de México en el puerto de Tampico en los límites entre los estados de Tamaulipas y Veracruz (fig. 1). La cuenca del río Pánuco corresponde a la cuarta más grande del país, con una superficie de 80.600 Km² y un escurrimiento medio anual de 13.500 millones de m³. Año con año, durante la temporada de lluvias (julio-noviembre) esta región se ve afectada por eventos de lluvias intensas que producen inundaciones, muchas de ellas resultado de la marea de tormenta y lluvias muy intensas asociadas a la incidencia de depresiones y ciclones tropicales [29,30]. A pesar de la importancia económica de la zona, existe una importante escasez de datos en la región y una necesidad clara de cuantificar de mejor manera los forzamientos climáticos.

De esta forma, esta investigación aboca sus esfuerzos al mejoramiento de los forzamientos físicos asociados a las inundaciones costeras de esta región. En particular, se aplica un método novedoso para determinar los niveles de marea de tormenta asociada a diversos periodos de retorno, dentro de la zona de la desembocadura del río Pánuco. Como se muestra en la figura 1, el área de interés está limitada por una región circular con un radio de 100 km con centro en la desembocadura del río Pánuco (22,26°N, 97,78°W). Dentro del archivo histórico de trayectorias de ciclones tropicales alrededor de esta zona, se determinó que en el periodo de 1951-2012, solo han tocado tierra 25 eventos, de los cuales 6 han sido catalogados dentro de las categorías 1-3 en la escala Saffir-Simpson al entrar a tierra. Esto demuestra la baja ocurrencia en el pasado reciente de eventos hidrometeorológicos en la zona, lo que a su vez limita la confiabilidad de un análisis de valores extremos con tan poca información. Adicionalmente, cabe señalar que no existen mediciones de nivel medio del mar durante el periodo de incidencia de estos fenómenos. Dada la necesidad de información histórica para evaluar el riesgo ante marea de tormenta en una región dada, la zona de estudio seleccionada es ideal para la aplicación de la metodología descrita en este trabajo de investigación.

3. Metodología

En la zona de estudio no existe información medida sobre el nivel del mar al paso de ciclones tropicales, con lo cual el marco de trabajo seleccionado consistió en la implementación de modelos

hidrodinámicos a fin de reproducir la sobreelevación del nivel medio del mar inducida por la presencia de ciclones tropicales sobre la costa [20]. La finalidad de la implementación de estos modelos es la obtención de series temporales del nivel del mar sobre las cuales realizar un análisis de valores extremos y calcular los valores de sobreelevación para distintos periodos de retorno. Para ello, se siguió la metodología que se resume en la figura 2 en donde se utiliza información de eventos de ciclones tropicales en el Golfo de México entre 1951 y 2012, a partir de la base de datos extendida de eventos históricos (118) conocida como HURDAT [31], y una base de datos de eventos sintéticos (1.550) generados en base a las condiciones medioambientales entre 1980 y 2010. Ambas bases de datos son comparadas a fin de justificar que los eventos sintéticos siguen la climatología de los eventos históricos. Posteriormente se seleccionan solamente los eventos que entran dentro de un radio de 100 km de la desembocadura del río Pánuco, resultando en 25 eventos históricos entre 1951 y 2012, y 120 eventos sintéticos generados entre 1980 y 2012. Cabe mencionar que se utilizaron los eventos a partir de 1951 para los eventos históricos a fin de contar con una mayor base de datos que los correspondientes al periodo de generación de los eventos sintéticos (1980-2012), periodo en el que solo se presentaron 12 eventos históricos. Con la información de los eventos seleccionados se generan los campos de viento para forzar un modelo hidrodinámico y obtener la sobreelevación del nivel mar en la desembocadura del río Pánuco. A partir de estos niveles, se utiliza un umbral mínimo para obtener la serie de datos sobre la cual aplicar el análisis de valores extremos y obtener los valores para distintos periodos de retorno. A continuación se expone una mayor descripción de cada una de las partes.

3.1. Eventos sintéticos

Debido a la falta de mediciones del nivel del mar en la zona de estudio durante ciclones tropicales y al número reducido de eventos históricos que han afectado la zona desde que existe información de ciclones tropicales, se utilizó la base de datos sintética del océano Atlántico presentada por Emanuel et al. [15]. Estos autores utilizan un modelo de advección en conjunto con información sintética de series temporales de intensidad del viento, para generar ciclones tropicales sintéticos que siguen la distribución mensual, varianza y covarianza de los datos diarios del reanálisis del NCEP/NCAR. Los datos sintéticos del reanálisis contienen una serie de trayectorias potenciales sintéticas junto con intensidades de huracanes [32] que cubren el periodo de tiempo definido entre los años 1980 y 2010; los ciclones tropicales sintéticos se generan por medio de la aplicación de un método de semillas aleatorias a esta información [21,23]. Los puntos semilla son distribuidos de manera aleatoria en tiempo y espacio, por medio de la ubicación de vórtices con núcleos cálidos con picos de velocidad de viento de 25 nudos (para más detalle véase Emanuel et al. [23]). De esta manera, se incrementa el número de eventos que se utilizan para la determinación de valores extremos de sobreelevación por marea de tormenta.

La figura 3a presenta para la costa Atlántica de México el total de 1.550 eventos sintéticos que contiene la base de datos, de los cuales se contabilizan 120 eventos dentro del círculo de 100 km de radio que delimita la zona de estudio (fig. 3b).

3.2. Generación de campos de viento

A partir de la información de los eventos sintéticos, correspondiente a velocidad de viento máxima, radios de viento máximo, presión en el ojo de la tormenta y presión en la isobara fuera de la influencia del huracán, se generaron los campos de viento de manera numérica por medio de la aplicación del modelo propuesto por Emanuel y Rotunno [16], mientras que para los campos de presión atmosférica se utilizó el modelo paramétrico propuesto por

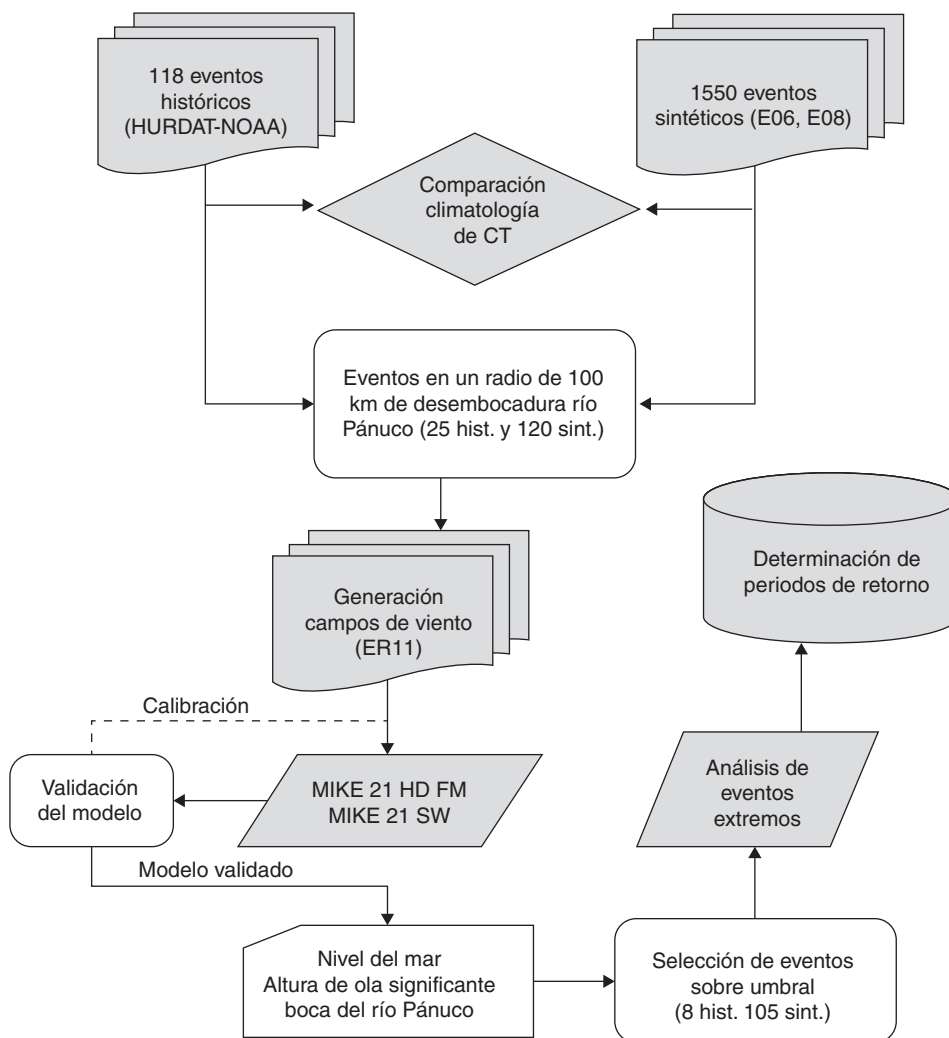


Figura 2. Diagrama de flujo de la metodología empleada.

Holland [13]. La selección de estos métodos se hizo siguiendo resultados presentados por Ruiz-Salcines [33], quien a partir de una evaluación de diversos modelos paramétricos de campos de viento determinó su validez para el caso de México; así como el estudio de Lin y Chavas [34], quienes comparan distintos modelos paramétricos y concluyen que el modelo de Emanuel y Rotunno [16] arroja mejores resultados al compararlo con modelos físicos. Con el propósito de obtener campos de viento que sirvan de referencia a los generados de manera sintética, se utilizaron los datos correspondientes a los 25 eventos históricos de la base de datos extendida del HURDAT [31], ocurridos entre 1951 y 2012. Para mayor información en la generación de campos de viento se recomienda consultar Meza-Padilla et al. [35].

3.3. Modelación numérica

Para la estimación de la sobre elevación del nivel del mar por efecto del viento ciclónico, se utilizó un modelo hidrodinámico en 2 dimensiones e integrado en la vertical conocido como MIKE21 HD FM desarrollado por el Danish Hydraulic Institute [26]. El modelo numérico bidimensional resuelve las ecuaciones de aguas someras e incluye un módulo de transporte de salinidad y temperatura. El modelo resuelve las ecuaciones de continuidad, cantidad de movimiento, temperatura, salinidad, densidad, y tiene un esquema de turbulencia finita. El modelo tiene su base teórica en la solución

de las ecuaciones promediadas de Reynolds y Navier Stokes (RANS-Reynolds Averaged Navier-Stokes, por sus siglas en inglés) incompresibles, sujetas a las suposiciones de Boussinesq y de presión hidrostática. La discretización espacial de las ecuaciones se lleva a cabo a través de un método de volúmenes finitos centrados en la celda, en mallas no estructuradas considerando elementos triangulares.

La puesta a punto de la herramienta numérica comienza con la definición de la malla del sistema y la determinación de las condiciones de frontera para el forzamiento de flujos en el sistema. Para este propósito, se utilizó una malla irregular de 18.125 elementos triangulares con resolución variable, tal y como se muestra en la figura 4, se usó una resolución más gruesa para la zona central del Golfo de México (6 km) respecto a aquella definida para la zona de la desembocadura del río (250 m). Para la definición de la batimetría en esta malla, se utilizó información proveniente de la batimetría ETOPO I [36], en combinación con información de cartas náuticas a fin de obtener una mayor resolución en la zona costera. La misma figura 4 presenta la malla con la información batimétrica asimilada en tonos azules.

Las condiciones de frontera para el forzamiento del modelo numérico consistieron en los campos de viento determinados por los 120 eventos sintéticos identificados en la zona de las cercanías de la desembocadura del río Pánuco, así como los 25 eventos históricos, a fin de complementar las bases de datos para

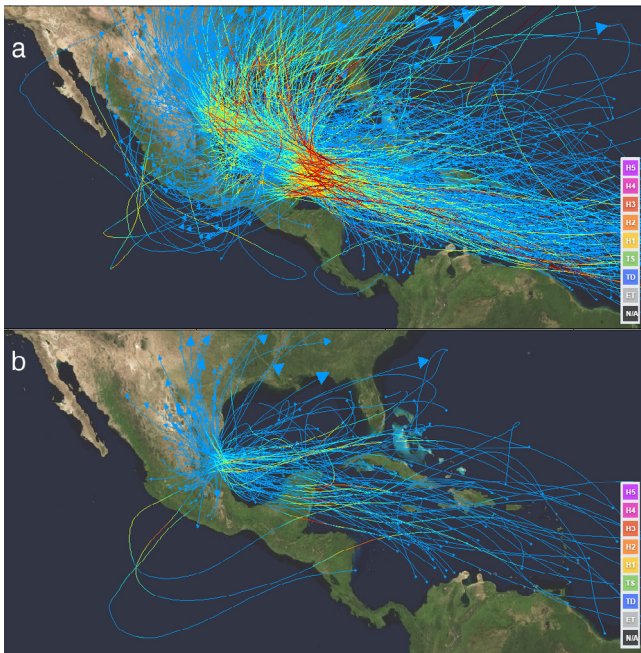


Figura 3. a) Eventos sintéticos en el litoral del Golfo de México; b) 120 eventos seleccionados por el círculo con radio de 100 km centrado en la desembocadura del río Pánuco.

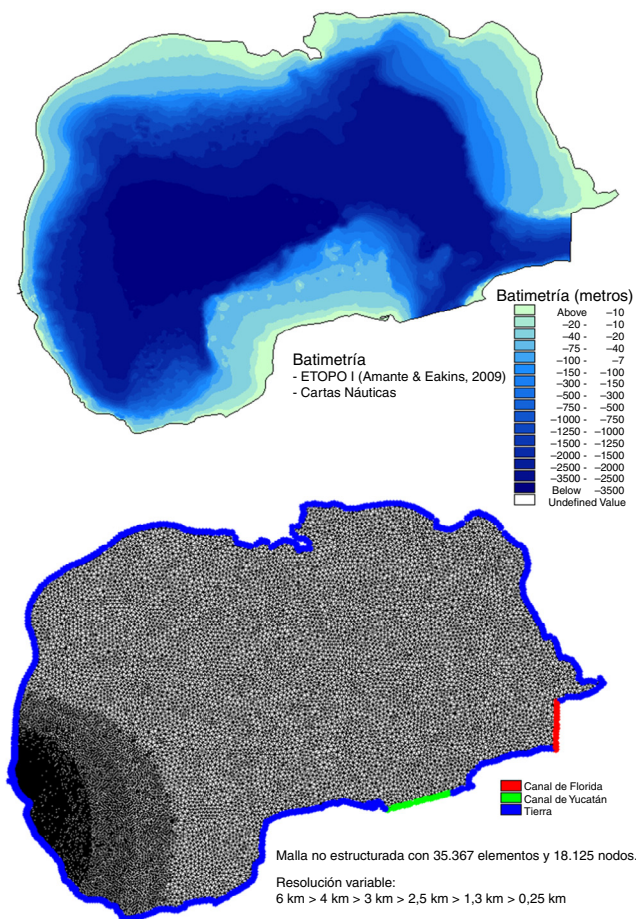


Figura 4. Batimetría y malla utilizada en las modelaciones hidrodinámicas.

el análisis de valores extremos. Debido a la falta de mediciones del nivel medio del mar durante ciclones tropicales en la zona de estudio, la calibración del modelo se realizó con el evento Ike (2008) y los valores medidos en la zona costera de Galveston, Texas. Los parámetros establecidos durante la calibración fueron los utilizados en el trabajo de Meza-Padilla et al. [35].

A partir de los resultados en las simulaciones numéricas se extrajeron las series temporales del nivel del mar en la zona de la desembocadura del río Pánuco. Las series de tiempo fueron analizadas para obtener el nivel máximo de cada evento y posteriormente realizar el análisis de valores extremos, como se describe en la sección 6.

4. Validez estadística de eventos sintéticos

Una vez integrado el modelo numérico, se revisaron los resultados correspondientes a las simulaciones de los eventos sintéticos para revisar si la distribución de probabilidad que se obtiene sigue aquella que determinan los eventos históricos ocurridos entre los años 1951 a 2012. Así, el histograma de frecuencias que se obtiene de los 118 eventos históricos es comparado con el que se obtiene de los 1.550 eventos sintéticos dentro del Golfo de México. La figura 5 presenta el histograma de frecuencia para ambos conjuntos considerando la intensidad del viento al momento de entrar a tierra, donde los eventos históricos están representados por las barras de color rojo y los eventos sintéticos por barras de color azul. La similitud entre ambos histogramas permite concluir que los eventos sintéticos conservan las propiedades estadísticas de los eventos históricos. De forma complementaria, la figura 6 introduce los histogramas calculados para los 118 eventos históricos y 1.550 eventos sintéticos respecto al punto de entrada a tierra, que se caracteriza por medio de sus coordenadas geográficas en latitud y longitud. En ambos casos se observa que la estadística de los eventos sintéticos es consistente con aquella reportada al considerar un número limitado de eventos históricos. Este tipo de comparaciones han sido presentadas por Emanuel et al. [22,23] como justificación del uso de eventos sintéticos; de esta manera, los resultados aquí presentados indican la validez de la metodología empleada, ya que con los eventos generados de manera sintética se tiene una climatología de huracanes similar a aquella registrada al considerar exclusivamente los eventos históricos.

5. Simulación numérica de la marea de tormenta

La validez de la inferencia de periodos de retorno a partir de datos históricos escasos es, por lo menos, problemática. Esto se debe a que la estimación de la frecuencia de eventos extremos es altamente sensible a la forma de la cola superior de la distribución que se utiliza, donde, por lo general, hay menos datos disponibles. En el caso de la zona de estudio no existen mediciones del nivel del mar durante ciclones tropicales, de esta manera, el uso de modelos numéricos permite generar estos niveles a partir de campos de viento. Sin embargo, aun así los eventos históricos son limitados y la posibilidad de simular de forma numérica los 120 eventos sintéticos disponibles proporciona información adicional que permitirá generar estimaciones más confiables.

Así, al tener un mayor número de eventos en la zona de interés, es posible determinar con mayor confiabilidad estadística los niveles esperados de marea de tormenta en la zona de la desembocadura del río Pánuco. De esta manera, se simuló de forma numérica los 120 eventos sintéticos y los 25 eventos históricos identificados por el círculo con radio de 100 km alrededor de la desembocadura del río Pánuco. Esto permitió considerar una gran cantidad de trayectorias e intensidades diferentes, de tal suerte que fuera posible la estimación numérica de la sobre elevación del nivel del mar por la

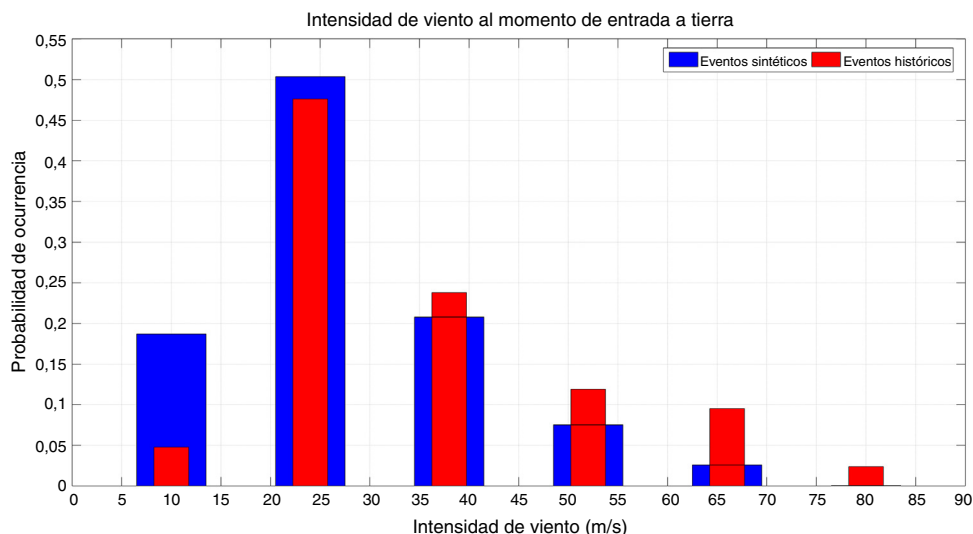


Figura 5. Probabilidad de ocurrencia de la intensidad del viento para eventos sintéticos e históricos del Atlántico en el periodo de 1980 a 2010 que entran a tierra en México.

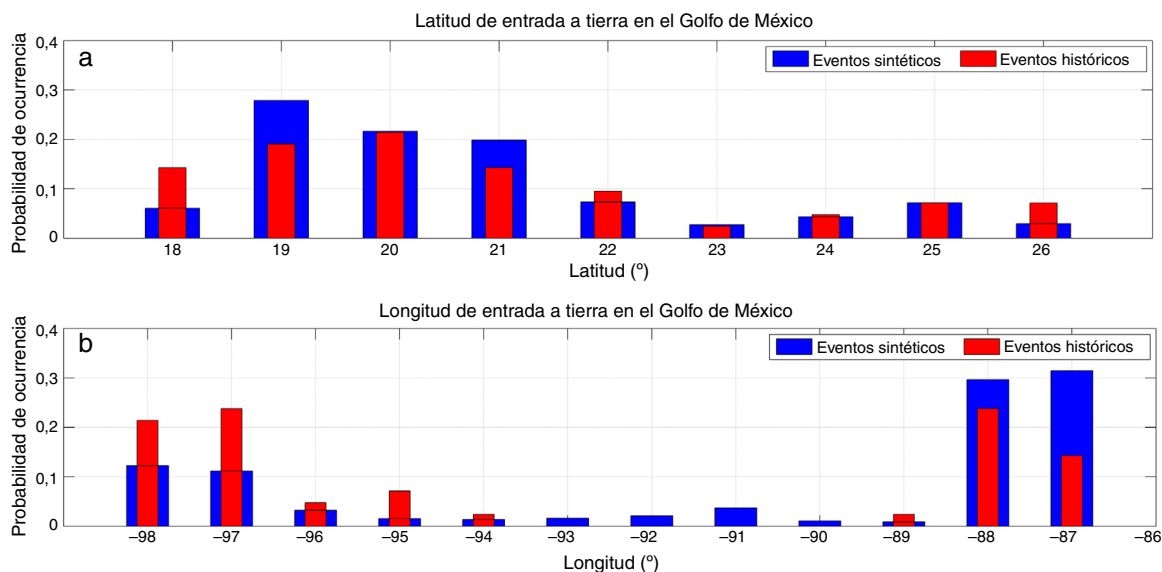


Figura 6. Histograma de frecuencia de las coordenadas de punto de entrada a tierra de huracanes en el Golfo de México para eventos sintéticos (color azul) e históricos (color rojo) en el periodo de 1980 a 2010. Panel a) latitud; panel b) longitud.

incidencia de estos fenómenos. La [figura 7](#) presenta el histograma de la marea de tormenta registrada en la zona de la desembocadura del río Pánuco, simulada con el modelo numérico MIKE21 HD FM considerando los 145 eventos identificados (120 sintéticos y 25 históricos), en donde se aprecia un pico en el valor de 0,1m con una cola decreciente que se extiende a valores de 2 m.

A manera de ejemplo, la [figura 8](#) presenta los resultados obtenidos de la simulación numérica de la marea de tormenta para los 6 huracanes de mayor intensidad, cuyas trayectorias se muestran en la [figura 9](#), y que fueron identificados dentro de la región circular ubicada en la desembocadura del río Pánuco. Tal y como se observa en los diferentes paneles de la [figura 8](#), los resultados numéricos incluyen mapas del nivel del mar (i.e. marea de tormenta) para cada uno de los eventos sintéticos, de tal modo que en cada nodo se retiene información sobre el nivel del mar máximo alcanzado durante el paso del evento.

A manera de resumen, la [figura 10](#) presenta los histogramas de frecuencia para los 1.550 eventos en el Golfo de México y los 120 eventos simulados, en donde se presentan la intensidad máxima del viento, el radio de vientos máximos y el déficit de presión

atmosférica (diferencia entre la presión central del huracán y la presión fuera de la influencia del ciclón tropical). Como es de esperarse, los eventos en la zona de estudio presentan una distribución similar a los eventos de todo el Golfo de México, pero no son exactamente iguales, lo cual es de esperarse debido al limitado número de eventos en la zona de estudio.

6. Análisis extremal de la marea de tormenta en la desembocadura del río Pánuco

Con el propósito de determinar los valores de diseño respecto al nivel de marea de tormenta esperado en la zona de la desembocadura del río Pánuco, se utilizan para cada uno de los eventos simulados de forma numérica los valores de sobreelevación máxima en este punto. Dada la escasez de datos medidos en este punto, se consideran además dentro de esta serie de datos extremos los resultados de las simulaciones correspondientes a los eventos históricos ocurridos en el pasado reciente. De esta manera, se agrupan 145 valores de sobreelevación por la incidencia de ciclones tropicales. Una primera revisión de esta información permite

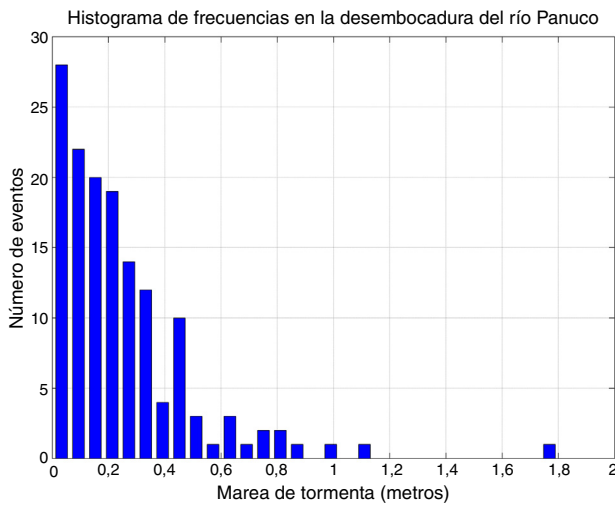


Figura 7. Histograma de frecuencias de valores máximos de marea de tormenta simulados con el MIKE 21 HD FM en la desembocadura del río Pánuco considerando los 145 eventos (120 sintéticos y 25 históricos).

identificar que dentro de este conjunto de datos, solo uno de ellos posee un valor superior a 1,5 m, 2 eventos son superiores a 1 m, 16 eventos son superiores a 0,5 m, 55 eventos son superiores a 0,25 m y 105 eventos superiores a 0,1 m. Para realizar el análisis de valores extremos, se utilizó una serie parcial con los valores sobre un umbral de 0,1 m, que si bien es un nivel bajo de sobreelevación, pudiera tener consecuencias en la zona de estudio al sumarse a la marea astronómica y al oleaje generado por el mismo ciclón tropical.

Si bien Lin et al. [20] utilizan la distribución Generalizada de Pareto en su estudio, otros autores han usado diferentes funciones de distribución, como la distribución Generalizada de Valores Extremos (GEV, Generalized Extreme Value) u otras (p. ej., Weibull, Gumbel, Exponencial). Por ejemplo, Irish et al. [37] utilizan la distribución GEV pero los casos en los que el periodo de retorno de 1.000 años supera el 75% de las mayores magnitudes de marea de tormenta emplean la distribución Gumbel. Así, la serie de datos obtenida de 105 valores (97 eventos sintéticos y 8 eventos históricos) por encima del umbral de 0,1 m es utilizada para realizar un ajuste por medio de la distribución GEV la cual unifica en una

sola a las distribuciones de tipo Gumbel, Frechet y Weibull, permitiendo un rango continuo de diversas formas de ajuste y una mayor estabilidad [38,39]. La función de distribución de probabilidad con un parámetro de ubicación μ , escala σ y forma k está dada por la siguiente expresión:

$$y = f(x|k, \mu, \sigma) = \left(\frac{1}{\sigma}\right) \exp\left(-\left(1 + k\frac{(x-\mu)}{\sigma}\right)^{-1/k}\right) \left(1 + k\frac{(x-\mu)}{\sigma}\right)^{-1-1/k} \quad (1)$$

Para:

$$1 + k\frac{(x-\mu)}{\sigma} > 0 \quad (2)$$

En aquellos casos en los que $k > 0$, se aplica una familia tipo Frechet, mientras que para $k < 0$ corresponde a familias del tipo Weibull. Para $k = 0$ se determina una familia de tipo Gumbel. Para la serie de datos de marea de tormenta correspondientes a la simulación numérica de los eventos sintéticos e históricos en la desembocadura del río Pánuco, el ajuste a esta distribución define unos valores $k = 0,4603$ (parámetro de forma), $\mu = 0,2058$ (parámetro de locación) y $\sigma = 0,1037$ (parámetro de escala) por medio del método de máxima verosimilitud (*mle – maximum likelihood estimation*). Si se considera un intervalo de confianza del 95% en esta distribución, los parámetros que definen los límites de confianza se definen por los siguientes rangos: $0,2308 < k < 0,6898$; $0,1819 < \mu < 0,2297$; y $0,0837 < \sigma < 0,1285$.

El resultado del ajuste se presenta en la figura 11, donde se relaciona la sobreelevación por marea de tormenta generada por ciclones tropicales (sintéticos + históricos) con su periodo de retorno. En esta figura, los círculos azules representan los periodos de retorno estimados de forma empírica para los datos de las simulaciones numéricas considerando los 105 eventos por encima del umbral de 0,1 m, mientras que la línea continua representa el mejor ajuste y las líneas discontinuas los límites de confianza de la distribución al 95%. Los valores correspondientes a los periodos de retorno medio ajustados con esta distribución se reportan en la tabla 1.

De esta manera, se demuestra que por medio de la aplicación de esta metodología es posible definir los niveles de periodo de retorno de marea de tormenta debido a la incidencia de ciclones tropicales en un sitio en donde hay escasez de información histórica.

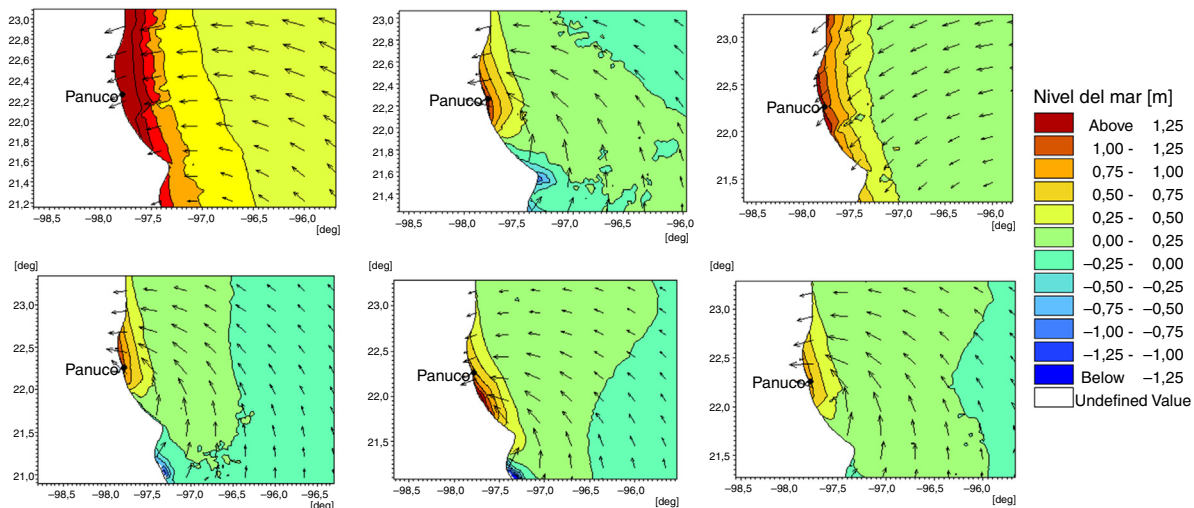


Figura 8. Nivel del mar y campos de viento de eventos sintéticos con trayectoria hacia el norte y aproximadamente paralela a la costa (panel superior) y con trayectoria normal a la costa (panel inferior).

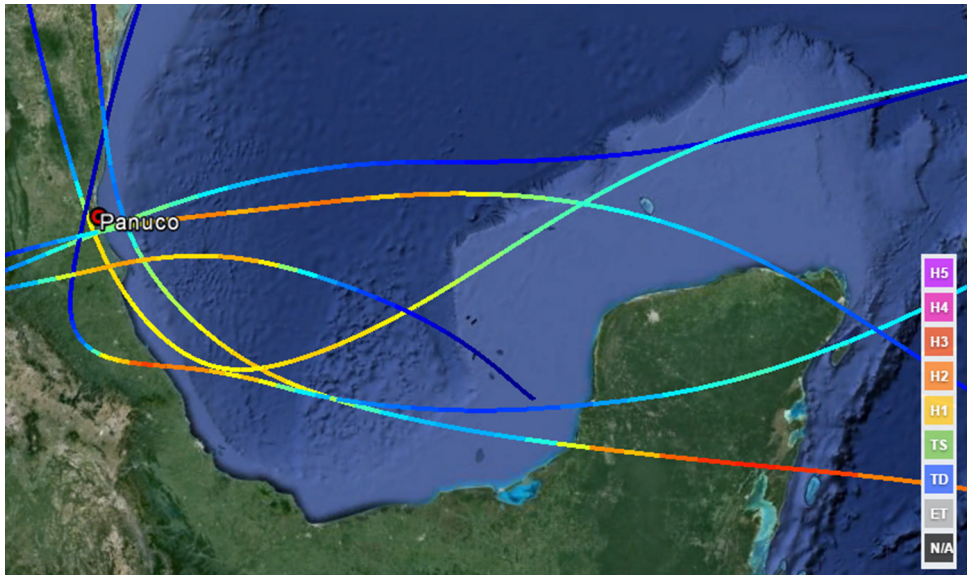


Figura 9. Eventos sintéticos (6) que generaron la mayor marea de tormenta en la entrada del río Pánuco en las simulaciones del MIKE 21 HD FM.

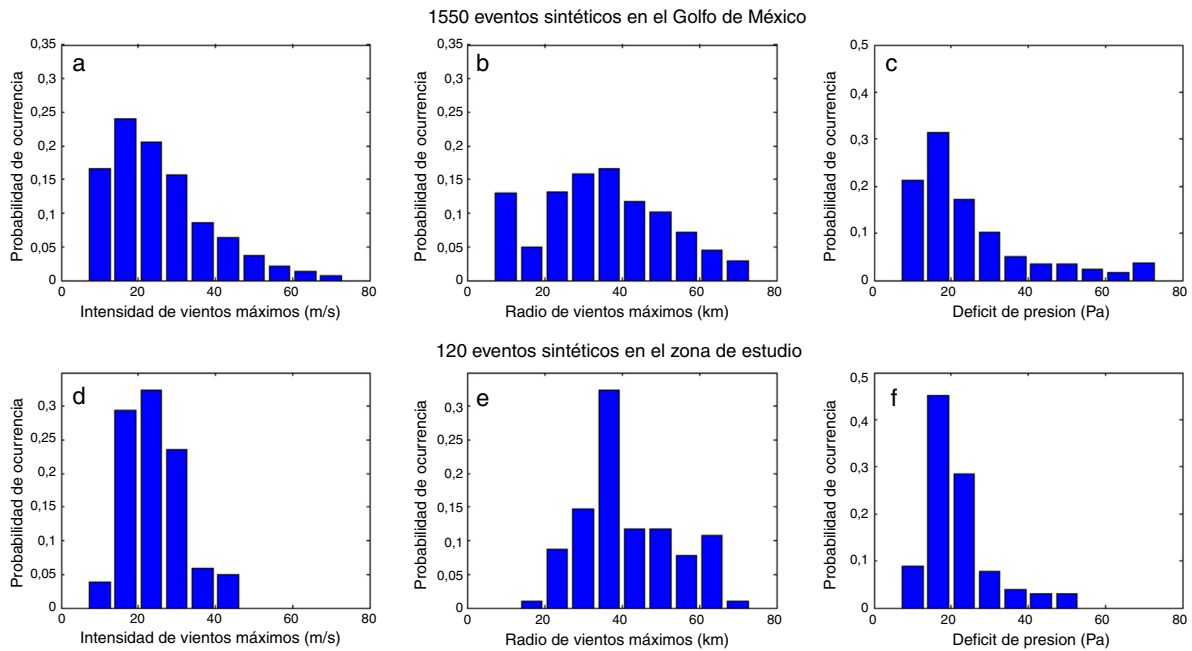


Figura 10. Histograma de frecuencia para intensidad del viento máximo, radio de vientos máximos y déficit de presión considerando 1.550 eventos en el Golfo de México (paneles superiores) y 120 eventos sintéticos dentro de la zona de estudio (paneles inferiores).

Tabla 1
Periodos de retorno para la marea de tormenta estimada en la desembocadura del río Pánuco con los huracanes sintéticos e históricos y solamente con los eventos históricos

Periodo de retorno (años)	Marea de tormenta (metros)	
	Eventos sintéticos e históricos (105)	Eventos históricos (8)
5	0,43	0,29
10	0,62	0,35
25	0,96	0,42
50	1,34	0,47
100	1,85	0,52
500	3,92	0,65
1.000	5,40	0,71

Con el propósito de demostrar la bondad del método propuesto, se presenta de manera complementaria resultados del análisis de valores extremos utilizando solamente los valores simulados correspondientes a aquellos eventos históricos que han pasado por la zona de interés y que generan mareas de tormenta por encima de 0,1 m (8 eventos). El ajuste medio de la distribución generalizada de valores extremos a estos datos está definido por los siguientes parámetros $k = 0,0209$; $\mu = 0,1868$ y $\sigma = 0,0700$ (método de máxima verosimilitud). La figura 12 presenta la gráfica de ajuste, donde los círculos azules representan los periodos de retorno estimados de forma empírica para los 8 valores de las simulaciones de eventos históricos por encima del umbral de 0,1 m, mientras que la línea continua representa el ajuste de la función de distribución y las líneas discontinuas los límites de confianza al 95%. En este resultado es evidente el alto grado de incertidumbre asociada a un análisis de

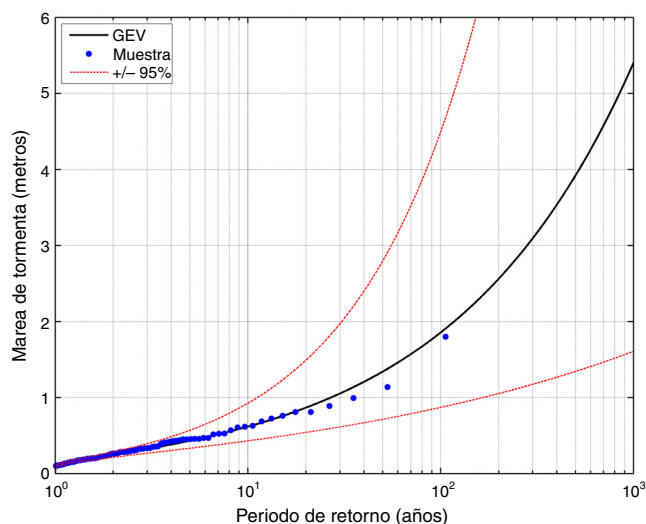


Figura 11. Gráfica de períodos de retorno de marea de tormenta en la desembocadura del río Pánuco considerando eventos históricos y sintéticos por encima del umbral de 0,1 m (105 eventos). La línea continua es el periodo de retorno obtenido del ajuste a la función de distribución, mientras que las líneas discontinuas son los límites de confianza al 95%. Los círculos azules representan los periodos de retorno estimados a través de la probabilidad empírica de Weibull.

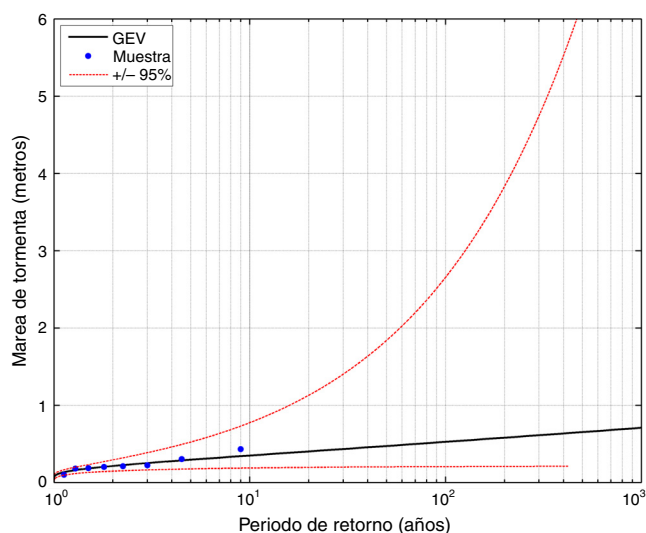


Figura 12. Gráfica de períodos de retorno de marea de tormenta en la desembocadura del río Pánuco considerando solo eventos históricos por encima del umbral de 0,1 m (8 eventos). La línea continua es el periodo de retorno obtenido del ajuste a la función de distribución, mientras que las líneas discontinuas son los límites de confianza al 95%. Los círculos azules representan los periodos de retorno estimados a través de la probabilidad empírica de Weibull.

valores extremos, bajo condiciones de escasez de datos, dado que las bandas de incertidumbre de la distribución generalizada abarcan un área grande de la gráfica y se expanden conforme aumenta el periodo de retorno. Además, el uso de los eventos históricos lleva a una clara subestimación de la marea de tormenta, que podría tener consecuencias en el diseño de estructuras y otro tipo de estimaciones, como podría ser la inundación por desbordamiento del río por efecto de la marea de tormenta en el desfogue del mismo. En este sentido, es posible afirmar que los resultados que se presentan en la figura 11 contribuyen de manera destacada a disminuir la incertidumbre en el ajuste de la distribución de valores extremos.

Por último, es sabido que la cota de inundación en zonas costeras depende también de variables como el oleaje de tormenta y el incremento relativo en el nivel del mar. Por ejemplo, el oleaje

de tormenta contribuye a una sobreelevación por la acumulación del agua en la costa, conocido como run-up en inglés, que se superpone a la marea de tormenta. Por otro lado, el incremento relativo del nivel del mar, ya sea por aumento del nivel medio del mar ya por subsidencia de la tierra, resulta en una mayor exposición de la costa a la marea de tormenta. De esta manera, es necesario extender este análisis a estas otras variables para considerar una valoración integral del riesgo de inundación en la zona costera.

7. Conclusiones

Este trabajo de investigación presentó la aplicación de una metodología que permite la evaluación de la marea de tormenta debida a ciclones tropicales, en un lugar frecuentemente afectado por este tipo de fenómenos (25 eventos en 1951-2012) y en el que no hay mediciones del nivel del mar (río Pánuco) durante estos eventos. Para ello, se utilizaron 1.550 ciclones tropicales con trayectorias dentro del Golfo de México, de los cuales 120 fueron seleccionados por su paso en las cercanías de la desembocadura del río Pánuco, México (en una región circular definida por un radio de 100 km).

Los campos de viento generados para estos 120 eventos en la desembocadura del río Pánuco en el Golfo de México se utilizaron como forzamiento del modelo hidrodinámico bidimensional MIKE21 HD FM a fin de determinar la sobreelevación máxima por el paso de cada uno de estos eventos en la desembocadura del río. De manera similar, se simulaban los 25 eventos históricos, a fin de complementar ambas bases de datos, teniendo un total de 145 eventos.

La validez del uso de eventos sintéticos fue demostrada a través de la comparación de histogramas de frecuencia de variables climatológicas de los eventos históricos respecto a aquellos generados exclusivamente de manera sintética, para todo el Golfo de México. Esta comparación permitió establecer una similitud en cuanto a las tendencias de ambos conjuntos de datos, validando el uso de la información sintética para robustecer la confiabilidad del análisis de valores extremos de marea de tormenta debida a la incidencia de ciclones tropicales en las inmediaciones de la desembocadura del río Pánuco.

Ajustando una distribución generalizada de valores extremos para los niveles del mar obtenidos por encima de un umbral de 0,1 m (105 eventos de los cuales 97 son eventos sintéticos y 8 eventos históricos), el trabajo presentado permitió determinar los niveles de marea de tormenta asociada a diversos periodos de retorno en una zona del país donde no hay datos disponibles. La comparación de los ajustes realizados solamente con la información generada por eventos históricos demuestra que el uso de eventos sintéticos junto con eventos históricos permite contar con una base de datos importante que disminuye la incertidumbre en la determinación de los valores extremos. Sin embargo, la falta de mediciones del nivel del mar en la zona de estudio limita el análisis para que este sea conclusivo, con lo cual se plantea este método como una propuesta para utilizar datos existentes y sintéticos en la ampliación de registros oceanográficos extremos (i.e. marea de tormenta) en la zona costera.

Conflicto de intereses

Los autores declaran no tener ningún conflicto de intereses.

Agradecimientos

Los autores agradecen el apoyo financiero del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología a través de su Fondo de Investigación Básica con el proyecto n.º 167003 y la beca de posgrado n.º 555771 otorgada al primer autor. Adicionalmente, el trabajo contó con el apoyo

del Proyecto 3337 del Instituto de Ingeniería de la UNAM. Los autores extienden un atento agradecimiento al Dr. Kerry Emanuel del Massachusetts Institute of Technology por facilitar los eventos sintéticos, al InterAmerican Institute for Global Change Research (IAI, Grant CRN II 2048), apoyado por el U.S. National Science Foundation (Grant GEO-0452325) y al apoyo técnico brindado por Gonzalo U. Martín Ruiz.

Bibliografía

- [1] Guha-Sapir D, Vos F, Below R, Ponserre S. Annual disaster statistical review: The numbers and trends. Brussels: CRED; 2012. p. 2012.
- [2] Ashley ST, Ashley WS. Flood fatalities in the United States. *J Appl Meteor Climatol* 2008;47:805–18.
- [3] Dutta D, Herath S, Musiak K. A mathematical model for flood loss estimation. *J Hydrol* 2003;277:24–49.
- [4] Hallegatte S, Green C, Nicholls RJ, Corfee-Morlot J. Future flood losses in major coastal cities. *Nature Climate Change* 2013;3:802–6, <http://dx.doi.org/10.1038/nclimate1979>.
- [5] Powell MD, Reinhold TA. Tropical cyclone destructive potential by integrated kinetic energy. *Bull Am Meteorol Soc* 2007;88:513–26.
- [6] Rego J, Li C. On the importance of the forward speed of hurricanes in storm surge forecasting: A numerical study. *Geophys Res Lett* 2010;36:L07609.
- [7] Resio DT, Westerink JJ. Hurricanes and the physics of surges. *Phys Today* 2008;61:33–8.
- [8] Lin N, Emanuel K, Oppenheimer M, Vanmarcke E. Physically based assessment of hurricane surge threat under climate change. *Nature Clim Change* 2012;2:462–7.
- [9] Aerts JCH, Lin N, Botzen W, Emanuel K, de Moel H. Low-probability flood risk modeling for New York City. *Risk Analysis* 2013;33:772–88.
- [10] Irish JL, Resio DT, Ratcliff JJ. The influence of storm size on hurricane surge. *J Phys Oc* 2008;38:2003–13, <http://dx.doi.org/10.1175/2008JPO3727.1>.
- [11] Weisberg RH, Zheng L. Hurricane storm surge simulations comparing three dimensional with two dimensional formulations based on an Ivan like storm over the Tampa Bay, Florida region. *J Geophys Res* 2008;113:C12001, <http://dx.doi.org/10.1029/2008JC005115>.
- [12] Depperman RC. Notes on the origin and structures of Philippine typhoons. *Bull Amer Meteor Soc* 1947;28:399–404.
- [13] Holland GJ. An analytic model of the wind and pressure profiles in hurricanes. *Mon Weather Rev* 1980;108:1212–8, [http://dx.doi.org/10.1175/1520-0493\(1980\)108<1212:AAMOTW>2.0.CO;2](http://dx.doi.org/10.1175/1520-0493(1980)108<1212:AAMOTW>2.0.CO;2).
- [14] Young IR, Sobey RJ. The numerical prediction of tropical cyclone wind-waves. Brisbane: Department of Civil & Systems Engineering, James Cook University of North Queensland; 1981.
- [15] Emanuel K, Des Autels A, Holloway C, Korty R. Environmental control of tropical cyclone intensity. *J Atmos Sci* 2004;61:843–58, [http://dx.doi.org/10.1175/1520-0469\(2004\)061<0843:ECOTCI>2.0.CO;2](http://dx.doi.org/10.1175/1520-0469(2004)061<0843:ECOTCI>2.0.CO;2).
- [16] Emanuel K, Rotunno R. Self-stratification of tropical cyclone outflow. Part I: Implications for storm structure. *J Atmos Sci* 2011;68:2236–49.
- [17] Jelesnianski CP, Chen J, Shaffer WA. SLOSH: Sea, lake, and overland surges from hurricanes, NOAA Tech. Rep. NWS 48. Miami: Florida: NOAA/AOML Library; 1972.
- [18] Luetich RA, Westernik JJ, Scheffner NW. ADCIRC: An advanced three dimensional circulation model for shelves, coasts, and estuaries. Report 1: Theory and Methodology of ADCIRC-2DDI and ADCIRC-3DL, Dredging Research Program Tech. Rep. DRP-92-6. Vicksburg, Miss: Coastal Eng. Res. Cent; 1992.
- [19] Westernik JJ, Luetich RA, Blain CA, Scheffner NW. ADCIRC: An advanced three dimensional circulation model for shelves, coasts, and estuaries. Report 2: User's Manual for ADCIRC-2DDI, Dredging Research Program Tech. Rep. DRP-92-6. Vicksburg, Miss: Coastal Eng. Res. Cent; 1992.
- [20] Lin N, Emanuel K, Smith JA, Vanmarcke E. Risk assessment of hurricane storm surge for the New York City. *J Geophys Res* 2010;115:D18121, <http://dx.doi.org/10.1029/2009JD013630>.
- [21] Emanuel K. Tropical Cyclone Activity Downscaled from NOAA-CIRES Reanalysis, 1908–1958. *J Adv Model Earth Syst* 2010;2, <http://dx.doi.org/10.3894/JAMES.2010.2.1>.
- [22] Emanuel K, Ravela S, Vivant E, Ricci C. A statistical deterministic approach to hurricane risk assessment. *Bull Am Meteorol Soc* 2006;87:299–314.
- [23] Emanuel K, Sundararajan R, Williams J. Hurricanes and global warming: Results from downscaling IPCC AR4 simulations. *Bull Am Meteorol Soc* 2008;89:347–67.
- [24] Pedrozo-Acuña A, Ruiz de Alegria-Arzaburu A, Mariño-Tapia I, Enriquez C, González-Villareal F. Factors controlling flooding at the Tonalá river mouth (Mexico). *J Flood Risk Manag* 2012;5:226–44, <http://dx.doi.org/10.1111/j.1753-318X.2012.01142.x>.
- [25] Reeve DE, Rózyński G, Li Y. An investigation of coincident extreme water levels in the Gulf of Gdańsk and the River Vistula. *J Hydraul Res* 2008;46:235–45.
- [26] Danish Hydraulic Institute (DHI), MIKE 21 & MIKE 3 Flow Model FM. Hydrodynamic and transport module. Scientific Documentation. DHI Water & Environment, 2014.
- [27] Appendini CM, Pedrozo-Acuña A, Valle-Levinson A. Storm surge at a western Gulf of Mexico site: Variations on Tropical Storm Arlene. *Int J Riv Basin Management* 2014;12:403–10, <http://dx.doi.org/10.1080/15715124.2014.880709>.
- [28] Pedrozo-Acuña A, Breña-Naranjo JA, Domínguez-Mora R. The hydrological setting of the 2013 floods in Mexico. *Weather* 2014;69:295–302, <http://dx.doi.org/10.1002/wea.2355>.
- [29] Pedrozo-Acuña A, Rodríguez-Rincón JP, Arganis-Juárez M, Domínguez-Mora R, González-Villareal F. Estimation of probabilistic flood inundation maps for an extreme event: Pánuco River, México. *J Flood Risk Manag* 2013;8:177–92, <http://dx.doi.org/10.1111/jfr3.12067>.
- [30] Breña-Naranjo JA, Pedrozo-Acuña A, Pozos-Estrada O, Jiménez-López S, López-López M. The contribution of tropical cyclones to rainfall in Mexico. *Phys Chem Earth* 2015, <http://dx.doi.org/10.1016/j.pce.2015.05.011>.
- [31] Demuth J, DeMaria M, Knaff JA. Improvement of advanced microwave sounder unit tropical cyclone intensity and size estimation algorithms. *J Appl Meteor* 2006;45:1573–81.
- [32] Emanuel K. Climate and tropical cyclone activity: A new model downscaling approach. *J Clim* 2006;19:4797–802.
- [33] Ruiz-Salcines P. Campos de viento para hindcast de oleaje: reanálisis, parámetros y fusión. Tesina de máster universitario en Ingeniería de Costas y Puertos, Santander, España, 2013, p.85.
- [34] Lin N, Chavas D. On hurricane parametric wind and applications in storm surge modeling. *J Geophys Res* 2012;117:D09120, <http://dx.doi.org/10.1029/2011JD017126>.
- [35] Meza-Padilla R, Appendini CM, Pedrozo-Acuña A. Hurricane induced waves and storm surge modeling for the Mexican coast. *Ocean Dynam* 2015;65:1199–211, <http://dx.doi.org/10.1007/s10236-015-0861-7>.
- [36] Amante C, Eakins BW. ETOPO 1. 1 Arc-Minute Global Relief Model: Procedures, data sources and analysis. En: NOAA Technical Memorandum NESDIS NGDC-24, 2009, p. 19.
- [37] Irish JL, Resio DT, Divoky D. Statistical properties of hurricane surge along a coast. *J Geophys Res* 2011;116:C10007, <http://dx.doi.org/10.1029/2010JC006626>.
- [38] Kotz S, Nadarajah S. Extreme value distributions. Theory and applications. London: Imperial College Press; 2000.
- [39] Coles S. An introduction to Statistical Modeling of Extreme Values. London: Springer; 2001. p. 208.